



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 09 733 T2** 2006.11.16

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 399 774 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G02B 27/46** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 09 733.9**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US02/20511**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 746 745.5**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2003/003062**

(86) PCT-Anmeldetag: **27.06.2002**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **09.01.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **24.03.2004**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **08.03.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **16.11.2006**

(30) Unionspriorität:
893922 28.06.2001 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:
Raytheon Co., El Segundo, Calif., US

(72) Erfinder:
**ANSLEY, A., David, Long Beach, CA 90803, US;
CHEN, W., Chungte, Irvine, CA 92620, US; BYREN,
W., Robert, Manhattan Beach, CA 90266, US**

(74) Vertreter:
Witte, Weller & Partner, 70178 Stuttgart

(54) Bezeichnung: **VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM VERZERREN EINES OPTISCHEN LICHTSTRAHLS, UM IONISIERUNG IN EINEM ZWISCHENFOKUS ZU VERMEIDEN**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Diese Erfindung betrifft optische Systeme und insbesondere optische Hochleistungssysteme, die einen Zwischenfokus des optischen Strahls enthalten.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Bei vielen optischen Systemen wird der optische Strahl durch optische Elemente auf eine Zwischenabbildung an einem Ort innerhalb des optischen Systems fokussiert. Wenn der optische Strahl ein Strahl mit niedriger Leistung ist, stellt dieser Zwischenfokus kein Problem dar. Wenn jedoch der optische Strahl ein Hochleistungsstrahl ist, kann der Zwischenfokus eine so hohe optische Leistungsdichte haben, dass Luft in der Umgebung des Zwischenfokus ionisiert wird. Die Ionisation der Luft, durch die der optische Strahl läuft, verzerrt den ionisierten optischen Strahl sowie andere optische Strahlen, die durch den Zwischenfokus laufen, in einer unkontrollierten Art und Weise.

[0003] Die Ionisation beeinflusst die Abbildung des optischen Strahls negativ. Optische Hochleistungsstrahlen werden normalerweise nicht abgebildet, aber in einigen Fällen umfasst der optische Strahl sowohl eine Hochleistungswellenlängenkomponente, die nicht abgebildet wird, als auch eine Wellenlängenkomponente mit geringer Leistung, die abgebildet wird. Ein Beispiel ist ein Laser-Designator, mit dem ein Hochleistungsdesignatorstrahl mit einer ersten Wellenlänge sich in eine Richtung entlang des optischen Pfads von einer Quelle innerhalb des optischen Systems zu einem externen Ziel ausbreitet, und bei dem sich ein Abbildungsstrahl mit geringer Energie mit einer zweiten Wellenlänge in die entgegengesetzte Richtung entlang des optischen Pfads zu einem Sensor innerhalb des optischen Systems ausbreitet. Falls das optische System einen Zwischenfokus umfasst, führt die Ionisation, die durch den optischen Hochleistungsstrahl an dem Zwischenfokus erzeugt wird, zu einer Wellenfrontverzerrung, die die Abbildung des optischen Strahls mit geringer Leistung nachteilig beeinflusst.

[0004] Um den Ionisationseffekt zu vermeiden, kann der Zwischenfokus in einem Vakuum gebildet werden. Es gibt keine zu ionisierende Luft und die zuvor diskutierten Probleme treten nicht auf. Eine Vakuumkammer, die einem optischen System hinzugefügt wird, um alle oder einen Teil der optischen Systeme aufzunehmen, fügt dem optischen System Gewicht und Komplexität hinzu, kann schwierig in der Wartung in feindlichen Umgebungen sein, um Leckagen zu vermeiden, erfordert in einigen Fällen die Verwendung von speziellen lichttransparenten Materialien und kann einen signifikanten Übertragungsverlust an den Fenstern des Vakuumsystems hervorrufen.

[0005] Es gibt ein Bedürfnis nach einem besseren Lösungsweg für optische Systeme, die solche Ionisationsprobleme vermeiden. Die vorliegende Erfindung erfüllt dieses Bedürfnis und liefert entsprechende Vorteile.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0006] Die vorliegende Erfindung stellt ein optisches System mit einem Zwischenfokus des optischen Strahls in Luft oder einem anderen Gas bereit, vermeidet aber die Ionisation des Gases durch einen Hochleistungsstrahl, der am Zwischenfokus fokussiert wird. Keine Vakuumkammer wird um den Ort des Zwischenfokus verwendet, so dass Gewicht, Komplexität, Wartungsschwierigkeiten, Materialanfordernisse und Übertragungsverluste, die mit einem vorhandenen Vakuum einhergingen, vermieden werden. Der vorliegende Lösungsweg arbeitet mit einer einzelnen Hochleistungswellenlängenkomponente des optischen Strahls, ist aber vorteilhafter einzusetzen, wo es sowohl eine Hochleistungswellenlängenkomponente und eine abzubildende Wellenlängenkomponente mit geringer Leistung gibt, die entlang des gleichen optischen Pfads durch das optische System übertragen werden.

[0007] Entsprechend der Erfindung gemäß Anspruch 1 besitzt ein optisches System eine Lichtquelle eines optischen Strahls, und einen Wellenfront-Verzerrungsgenerator, der eine bekannte Wellenfrontverzerrung in zumindest eine Wellenlängenkomponente des optischen Strahls vor der Ausbildung einer Zwischenabbildung einführt. Eine Fokussierungsvorrichtung empfängt den optischen Strahl, erzeugt die Zwischenabbildung des optischen Strahls und gibt den optischen Strahl aus. Ein Beispiel einer Fokussierungsvorrichtung ist eine Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung. Nach der Ausbildung der Zwischenabbildung führt eine Wellenfront-Verzerrungskorrektur-Vorrichtung eine Wellenfrontverzerrungskorrektur in jede Komponente des optischen Strahls ein, in die die bekannte Wellenfrontverzerrung durch den Wellenfrontverzerrungsgenerator eingeführt wurde. Die Wellenfrontverzerrungskorrektur ist das Umgekehrte der bekannten Wellenfrontverzerrung, die in den optischen Strahl durch den Wellenfrontverzerrungsgenerator eingeführt wurde. Der Wellenfrontverzerrungsgenerator und die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung können jeweils ein reflektives optisches Element oder ein refraktives optisches Element sein. Der Wellenfrontverzerrungsgenerator und die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung können getrennt von der Fokussierungsvorrichtung sein, oder der Wellenfrontverzerrungsgenerator oder die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung können einstückig mit der Fokussierungsvorrichtung sein.

[0008] Bei einer Ausführungsform hat der optische

Strahl exakt eine Wellenlängenkomponente, der Wellenfrontverzerrungsgenerator führt die bekannte Wellenfrontverzerrung in die exakt eine Wellenlängenkomponente ein, und die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung führt die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung in die exakt eine Wellenlängenkomponente ein. Bei einer anderen Ausführungsform besitzt der optische Strahl eine erste Wellenlängenkomponente und eine zweite Wellenlängenkomponente, führt der Wellenfrontverzerrungsgenerator die bekannte Wellenfrontverzerrung in die erste Wellenlängenkomponente ein, aber nicht in die zweite Wellenlängenkomponente, und führt die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung in die erste Wellenlängenkomponente, aber nicht in die zweite Wellenlängenkomponente ein. Bei dieser zweiten Ausführungsform können die erste Wellenlängenkomponente und die zweite Wellenlängenkomponente in die gleiche Richtung laufen, oder sie können in entgegengesetzte Richtungen durch das optische System laufen.

[0009] Ein Verfahren zur Verarbeitung eines optischen Strahls umfasst die Schritte des Liefers des optischen Strahls, danach Einführen einer bekannten Wellenfrontverzerrung in zumindest eine Wellenlängenkomponente des optischen Strahls, um einen verzerrten optischen Strahl zu bilden, danach Bilden einer Zwischenabbildung des verzerrten optischen Strahls, und danach Einführen einer Wellenfrontverzerrungskorrektur in jede Wellenlängenkomponente des optischen Strahls, in die die bekannte Wellenfrontverzerrung eingeführt wurde. Die Wellenfrontverzerrung ist das Umgekehrte der bekannten Wellenfrontverzerrung, die in den optischen Strahl eingeführt wurde. Dieses Verfahren kann auf einen optischen Strahl angewendet werden, der eine einzelne Wellenlängenkomponente besitzt, oder auf einen optischen Strahl, der mehr als eine Wellenlängenkomponente besitzt, wie zuvor beschrieben.

[0010] Der vorliegende Lösungsweg vermeidet die Bildung einer Zwischenabbildung mit hoher Energiedichte, indem der optische Strahl verzerrt wird oder mit einer Aberration versehen wird, bevor er den Ort der Zwischenabbildung erreicht, und indem dann die Wellenfrontverzerrung des optischen Strahls korrigiert wird, nachdem er den Ort der Zwischenabbildung durchlaufen hat. Der Wellenfrontverzerrungsgenerator zum Einführen einer gesteuerten, bekannten Wellenfrontverzerrung kann entworfen werden, indem herkömmliche optische Entwurfstechniken verwendet werden. Das Nachführen des verzerrten optischen Strahls durch den Ort der Zwischenabbildung ermöglicht eine Bestimmung der Energiedichte des verzerrten optischen Strahls an dem Ort, und die erforderliche Wellenfrontverzerrung wird ausgewählt, so dass die Energiedichte unterhalb dem Wert liegt, der das an diesem Ort der Zwischenabbildung vor-

handene Gas ionisieren würde. Da die Wellenfrontverzerrung aus den Entwurfparametern bekannt ist, kann die entsprechende umgekehrte Wellenfrontverzerrungskorrektur leicht in die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung eingearbeitet werden. Der Wellenfrontverzerrungsgenerator und die Wellenfront-Verzerrungs-Korrektur-Vorrichtung sind konfiguriert, um den optischen Strahl invers zueinander zu verzerren, und arbeiten deshalb gleich gut auf den optischen Strahlwellenlängenkomponenten, die sich in die gleiche Richtung ausbreiten oder auf den optischen Strahlwellenkomponenten, die sich in entgegengesetzte Richtungen ausbreiten.

[0011] Weitere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden detaillierteren Beschreibung der bevorzugten Ausführungsform zusammen mit den begleitenden Zeichnungen, die rein beispielhaft die Prinzipien der Erfindung darstellen. Der Umfang der Erfindung ist jedoch nicht auf diese bevorzugte Ausführungsform beschränkt.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0012] [Fig. 1](#) ist eine Darstellung einer Fokussierungsvorrichtung;

[0013] [Fig. 2](#) ist ein Blockdiagramm eines optischen Systems, das die vorliegende Erfindung verwendet;

[0014] [Fig. 3](#) ist eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform des optischen Systems von [Fig. 2](#);

[0015] [Fig. 4](#) ist eine Darstellung der Fokussierungsvorrichtung von [Fig. 1](#), die aber die Lösung von [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) enthält;

[0016] [Fig. 5](#) ist eine schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform des optischen Systems von [Fig. 2](#);

[0017] [Fig. 6](#) ist eine schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform des optischen Systems von [Fig. 2](#);

[0018] [Fig. 7](#) ist eine schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform des optischen Systems von [Fig. 2](#);

[0019] [Fig. 8](#) ist eine schematische Seitenansicht eines reflektiven Wellenfrontverzerrungskorrektors; und

[0020] [Fig. 9](#) ist ein Flussdiagramm eines Verfahrens zur Ausführung der Erfindung.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0021] **Fig. 1** zeigt ein bekanntes optisches System **20** mit einer Fokussierungsvorrichtung in Form einer Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22**. Die Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22** umfasst einen Hauptspiegel **24**, einen Zweitspiegel **26** und einen Drittspiegel **28**. Ein optischer Strahl **30** durchläuft die Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22** in beide Richtungen. Die Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22** fokussiert den optischen Strahl **30** auf eine Zwischenabbildung **32**, die zwischen dem Zweitspiegel **26** und dem Drittspiegel **28** liegt. Falls der optische Strahl **30** ein Hochleistungsstrahl, wie beispielsweise ein Hochleistungslaserstrahl ist, oder einen solchen enthält, kann die Energiedichte des optischen Strahls **30** am Ort der Zwischenabbildung **32** so hoch sein, dass die Luft oder ein anderes Gas an diesem Ort ionisiert wird. Das ionisierte Gas verzerrt den optischen Strahl in unkontrollierter Weise, und stört die optische Leistung des optischen Systems an anderen Orten.

[0022] Um diese unkontrollierte Wellenfrontverzerrung zu verhindern, wo eine solche Fokussierungsvorrichtung verwendet werden muss, bestand die frühere Praxis darin, das ionisierbare Gas aus der Umgebung der Zwischenabbildung **32** zu entfernen, indem ein Vakuumsystem **34** verwendet wird. Das Vakuumsystem **34** umfasst eine Vakuumkammer **36**, die durch eine Vakuumpumpe **38** evakuiert wird, und Fenster **40** und **42**, die den optischen Strahl **30** in und aus der Vakuumkammer **36** übertragen. In diesem Fall ist das Vakuumsystem als die gesamte Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22** umschließend dargestellt, aber es kann stattdessen konfiguriert sein, um nur den Ort der Zwischenabbildung **32** zu umschließen. Während dies für einige Anwendungen machbar und geeignet ist, erhöht die Verwendung des Vakuumsystems **34** das Gewicht, die Komplexität und die Kosten des optischen Systems **20**. Die Wartung des Vakuumsystems **34** mit seiner Pumpe und den Abdichtungen, um ein Vakuum zu gewährleisten, wenn das optische System **20** verwendet wird, ist von ständiger Bedeutung. Zusätzlich erfordert das Vakuumsystem **34** spezielle Materialien für die Fenster **40** und **42**, und die vorhandenen Fenster **40** und **42** dämpfen den optischen Strahl **30** und können zu einer unakzeptablen Systemerhitzung führen. Diese Probleme mit der Ausbildung einer Zwischenabbildung eines optischen Hochleistungsstrahls wurden anhand der Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22** als Fokussierungsvorrichtung beschrieben, allerdings treten die gleichen Probleme bei anderen Typen von optischen Systemen auf, die eine Zwischenabbildung eines optischen Hochleistungsstrahls bilden.

[0023] **Fig. 2** zeigt ein optisches System **50** entspre-

chend der vorliegenden Erfindung, das diese Probleme überwindet und die Notwendigkeit eines Vakuumsystems beseitigt. Das optische System **50** umfasst eine Lichtquelle **52** für jede Wellenlängenkomponente eines optischen Strahls **54**. Ein Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** führt eine bekannte Wellenfrontverzerrung (d.h. eine Aberration der Licht-Wellenfront) in zumindest eine Wellenlängenkomponente des optischen Strahls ein, bevor eine Zwischenabbildung gebildet wird. Eine Fokussierungsvorrichtung **58** empfängt den optischen Strahl **54**, erzeugt eine Zwischenabbildung des optischen Strahls **54** und gibt den optischen Strahl **54** aus (In diesem Zusammenhang umfasst eine „Zwischenabbildung“ eine Zwischenabbildung oder einen anderen räumlich fokussierten oder konzentrierten Zwischenteil des optischen Strahls, bei dem die örtliche Strahlenergiedichte über seinen Wert an einem entfernten Ort erhöht ist anders als bei einer Endabbildung oder Fokus des Strahls. Solche Zwischenabbildungen tauchen häufig in optischen Systemen auf.) Nach der Ausbildung der Zwischenabbildung in der Fokussierungsvorrichtung **58** führt ein Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** eine Wellenfrontverzerrungskorrektur in jede Komponente des optischen Strahls **54** ein, in die die bekannte Wellenfrontverzerrung durch den Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** eingeführt wurde. Die Wellenfrontverzerrungskorrektur ist das Umgekehrte der bekannten Wellenfrontverzerrung, die in den optischen Strahl **54** durch den Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** eingeführt wurde.

[0024] Die Natur und die Größe der bekannten Wellenfrontverzerrung werden ausgewählt, um die Zwischenabbildung ausreichend zu verändern, so dass die optische Energiedichte des optischen Strahls **54** an allen Stellen innerhalb und nahe des Orts der Zwischenabbildung unterhalb der zur Ionisierung der Luft oder eines anderen Gases erforderlichen Energie zu halten, die/das an dem Ort der Zwischenabbildung vorhanden ist. Diese Berechnung wird leicht mit Hilfe von optischen Programmen, wie beispielsweise CODEV™-Programm, durchgeführt, die im Stand der Technik für andere Programme bekannt sind. Diese Programme ermöglichen das Nachführen der Strahlpfade und die Berechnung der optischen Leistungsdichte an jedem Ort entlang des Strahlpfads einschließlich des Orts der Zwischenabbildung. Das Ergebnis des Einführens der bekannten Wellenfrontverzerrung besteht darin, dass die Luft oder ein anderes Gas an dem Ort der Zwischenabbildung nicht ionisiert wird und damit kein Vakuumsystem benötigt wird. Die Natur und die Größe der Wellenfrontverzerrung, die von dem Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** eingeführt wird, sind bekannte Entwurfsparameter, und deshalb werden die gleichen Entwurfsparameter eingesetzt, allerdings invers, um den Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** zu entwerfen. Folglich ist der optische Strahl, der den Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** verlässt, frei von einer optischen

Wellenfrontverzerrung, die von dem Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** eingeführt wurde. Da der optische Pfad durch das optische System **50** reziprok ist, kann Licht entlang eines Strahlpfads in beide Richtungen durch das optische System **50** laufen und die Vorteile der vorliegenden Lösung nutzen.

[0025] Der allgemeine Lösungsweg von [Fig. 2](#) kann auf einer Vielzahl von Wegen implementiert werden, und die [Fig. 3–Fig. 8](#) zeigen einige dieser Wege. Diese Beispiele sind mit Bezug auf die Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung als Fokussierungsvorrichtung **58** dargestellt, allerdings sind die dargestellten Wellenfrontverzerrungsgeneratoren und Wellenfrontverzerrungskorrektoren in gleicher Weise bei anderen Typen von Fokussierungsvorrichtungen anwendbar, die eine Zwischenabbildung erzeugen (d.h. eine Abbildung oder ein anderer fokussierter oder konzentrierter Bereich des Strahls, der nicht die Endabbildung auf einem Sensor oder einer anderen Vorrichtung ist). Bei diesen Beispielen sind eine Anzahl von gemeinsamen Elementen mit den gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet, und die andere Diskussion wird in die Diskussion jedes Beispiels, wenn geeignet, mit eingepasst. Nur ein einzelner Strahlpfad ist in den gesamten Zeichnungen, wie in den [Fig. 3](#), [Fig. 5](#), [Fig. 6](#), [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) dargestellt, um Verwirrung zu vermeiden. Merkmale der verschiedenen Ausführungen können konsistent in anderen Kombinationen miteinander verwendet werden.

[0026] In [Fig. 3](#) ist der Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** eine refraktive Linse, die an der Eingangspupille der Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22** platziert ist, die als Fokussierungsvorrichtung **58** dient. Der refraktive Linsen-Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** ist eine Linse, die aus einem Material hergestellt ist, die für Wellenlängen in dem Lichtstrahl **54** transparent ist. Die Eintrittsseite der Linse kann flach sein, und die Ausgangsseite kann eine asphärische Oberfläche in einer Form haben, die entworfen ist, um die gewünschte Aberration in den Lichtstrahl einzuführen. [Fig. 4](#) zeigt diese Anordnung in größerem Detail. Der refraktive Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** ist an der Eingangspupille der Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22** platziert, um den optischen Strahl **54** kontrolliert zu verzerren, so dass ein Zwischenfokus **62** eine Aberration auf eine große Punktgröße mit einer geringen optischen Leistungsdichte erfährt, im Gegensatz zu einer sehr kleinen Punktgröße mit einer hohen optischen Leistungsdichte. Der refraktive Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** ist entworfen, so dass die Aberration an dem mit einer Aberration versehenen Zwischenfokus **62** ausreichend ist, dass das Gas an diesem Ort nicht ionisiert. Die bekannte Wellenfrontverzerrung wird reflektiv korrigiert in diesem Fall durch die Reflektion an dem Hauptspiegel **24**, der als Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** der Dreispiegel-Anastigmatik-Vorrichtung **22** dient. Der Hauptspiegel ist entworfen, um

die gewünschte Wellenfrontverzerrungskorrektur einzuführen, die das Umgekehrte der Wellenfrontverzerrung ist, die durch den Linsenverzerrungsgenerator **56** eingeführt wurde. Diese Ausführungsform hat den Vorteil, dass sie auf den Lichtstrahl **54** mit einem breiten Spektralband und einem breiten Sichtfeld anwendbar ist. In diesem Fall sind der Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** und der Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** integraler Bestandteil der Fokussierungsvorrichtung **58**. Zurückkommend auf die [Fig. 3](#) sind die Faltspiegel **64** in diesem Fall reflektive Spiegel, die keine Wellenfrontverzerrungen in den reflektierten optischen Strahl **54** einführen.

[0027] Der Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** der [Fig. 5](#) besitzt einen refraktiven Linsen-Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** und einen refraktiven Linsen-Wellenfrontverzerrungskorrektor **60**, deren jeder nicht integraler Bestandteil der Fokussierungsvorrichtung **58** ist. Der refraktive Linsen-Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** besitzt die asphärische Oberfläche, die umgekehrt zu der Aberration geformt ist, die von der refraktiven Linse des Wellenfrontverzerrungsgenerators **56** eingeführt wird. Eine reflektiver Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** oder ein diffraktiver Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** können an Stelle des refraktiven Wellenfrontverzerrungsgenerators **58** in dieser und anderen Ausführungsformen verwendet werden, sofern sie einsetzbar sind. Ein reflektiver Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** oder ein diffraktiver Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** können an Stelle des refraktiven Wellenfrontverzerrungskorrektors **60** bei dieser und anderen Ausführungsformen, wo einsetzbar, verwendet werden.

[0028] Die Ausführungsform von [Fig. 6](#) zeigt reziproke Lichtstrahlen **54** mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen λ_1 und λ_2 , die die Fokussierungsvorrichtung **58** auf dem gleichen Strahlpfad, aber in entgegengesetzte Richtungen, durchlaufen. Die Quelle **52** ist die Quelle eines Lichtstrahls **54a** einer ersten Wellenlängenkomponente λ_1 , die sich von links nach rechts in [Fig. 6](#) ausbreitet. Eine Quelle (nicht gezeigt, aber typischerweise eine andere optische Komponente, die das Licht von einer betrachteten Szene empfängt) außerhalb des optischen Systems **50** ist die Quelle des Lichtstrahls **54b** einer zweiten Wellenlängenkomponente λ_2 , die von rechts nach links in der Ansicht von [Fig. 6](#) läuft. Der Lichtstrahl **54a** durchläuft einen wellenlängenselektiven Spiegel **66**, wobei der Lichtstrahl **54b** von dem wellenlängenselektiven Spiegel **66** auf einen Detektor **68** reflektiert wird. Der Lichtstrahl **54a** mit der Wellenlängenkomponente λ_1 durchläuft den refraktiven Wellenfrontverzerrungsgenerator **56**, die Fokussierungsvorrichtung **58** und den refraktiven Wellenfrontverzerrungskorrektor **60**. Der Lichtstrahl **54b** mit der Wellenlängenkomponente λ_2 tritt von rechts ein, durchläuft den Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** (der für den Lichtstrahl **54b** momentan dazu dient, die Wellen-

frontverzerrung in den Lichtstrahl **54b** einzuführen), durchläuft die Fokussierungsvorrichtung **58** in entgegengesetzte Richtung zu der Richtung des Lichtstrahls **54a**, durchläuft den refraktiven Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** (der bei dem Lichtstrahl **54b** momentan dazu dient, die Wellenfrontverzerrung in dem Lichtstrahl **54b** zu korrigieren), wird durch den wellenlängenselektiven Spiegel **66** reflektiert und wird von dem Detektor **68** empfangen. Die Fähigkeit des optischen Systems **50**, entgegengesetzt wandernde Lichtstrahlen **54a** und **54b** zu verarbeiten, ergibt sich aus der reversiven Natur des optischen Systems, insbesondere der Komponenten **56** und **60**.

[0029] **Fig. 7** zeigt ein optisches System **50**, in dem nur die erste Wellenlängenkomponente **54a** verzerrt und korrigiert wird. Die erste Wellenlängenkomponente **54a** durchläuft den refraktiven optischen Korrektor **56** von links nach rechts, den wellenlängenselektiven Spiegel **66** und die Fokussierungsvorrichtung **58**. Sie wird dann von einem selektiven Wellenfrontverzerrungskorrektor **70** reflektiert, der als Wellenfrontverzerrungskorrektor **60** für die erste Wellenlängenkomponente **54a** dient, um die Wellenfrontverzerrung in der ersten Wellenlängenkomponente **54a** zu korrigieren, aber keine Auswirkung auf die zweite Wellenlängenkomponente **54b** besitzt mit der Ausnahme, dass sie reflektiert wird. Die zweite Wellenlängenkomponente **54b**, die von rechts nach links läuft, reflektiert an dem selektiven Wellenfrontverzerrungskorrektor **70** ohne eine Wellenfrontverzerrung zu erfahren, durchläuft die Fokussierungsvorrichtung **58** und wird an dem wellenlängenselektiven Spiegel **66** und auf den Detektor **68** reflektiert (ohne die Komponente **56** zu durchlaufen). Somit wird in der Ausführungsform des optischen Systems **50** von **Fig. 7** nur der Lichtstrahl **54a** verzerrt und korrigiert, bevor er die Fokussierungsvorrichtung **58** durchläuft, und keine Wellenfrontverzerrung/-korrektur wird in den Lichtstrahl **54b** eingefügt. Diese Selektivität ist passend, da bei diesem Beispiel der Lichtstrahl **54a** der Wellenlänge λ_1 ein Hochleistungslaserstrahl ist, wie beispielsweise bei einer 1,06 Mikrometerwellenlänge, während der Lichtstrahl **54b** der Wellenlänge λ_2 ein Strahl geringer Leistung im sichtbaren, nahen Infrarot, Mittelinfrarot und/oder einem fernen Infrarotwellenlängen-Bereich ist. Nur der Hochleistungslichtstrahl **54a** kann die Ionisation in der Fokussierungsvorrichtung **58** verursachen, falls die Wellenfront nicht verzerrt wird. Die Ausführungsformen von **Fig. 6** und **Fig. 7** unterscheiden sich darin, dass die Ausführungsform von **Fig. 6** Licht aller Wellenlängenkomponenten verzerrt und korrigiert, während die Ausführungsform von **Fig. 7** nur die Wellenlängenkomponente (Lichtstrahl **54a**) ausreichend hoher optischer Energiedichte verzerrt und korrigiert, die Gas an dem Zwischenfokus in der Fokussierungsvorrichtung **58** ionisieren würde.

[0030] Eine Form des selektiven Wellenfrontverzer-

rungskorrektors **70** der **Fig. 7** ist in **Fig. 8** gezeigt. Ein transparentes Glas **72** (oder ein anderes transparentes Material) besitzt einen Dünnschicht **74** mit mehreren Schichten, wie beispielsweise ein Rugatefilter, der auf eine verzerrungsfreie Frontfläche **74** gebracht wird. Der mehrschichtige Dünnschicht **76** wird entworfen, um Licht der Wellenlänge λ_2 zu reflektieren, aber Licht der Wellenlänge λ_1 zu übertragen. Solche mehrschichtigen Dünnschichten **76** sind weit bekannt für andere Zwecke, wie beispielsweise antireflektive Beschichtungen. Der Lichtstrahl **54b** wird folglich an dem selektiven Wellenfrontverzerrungskorrektor **70** ohne jegliche Wellenfrontverzerrung reflektiert. Das heißt, dass für den Lichtstrahl **54b** der selektive Wellenfrontverzerrungskorrektor **70** nur als ein Faltspiegel dient. Der Lichtstrahl **54a** durchläuft den mehrschichtigen Dünnschicht **76** und wird an dessen Rückfläche **78** reflektiert. Die Rückfläche **78** besitzt das Gegenteil der Wellenfrontverzerrung, die in den Lichtstrahl **54** an dem refraktiven Wellenfrontverzerrungsgenerator **56** von **Fig. 7** eingeführt wurde. Nach der Reflektion von der Wellenfrontverzerrungs-Korrekturrückfläche **78** durchläuft der Lichtstrahl **54a** wiederum den mehrschichtigen Dünnschicht **76**. Der selektive Wellenfrontverzerrungskorrektor **70** führt folglich die erforderliche Wellenfrontverzerrungskorrektur in den Lichtstrahl **54a** ein, führt aber keine Wellenfrontverzerrung in den Lichtstrahl **54b** ein.

[0031] **Fig. 9** zeigt eine bevorzugte Lösung zur Ausführung des Verfahrens der Erfindung. Das Verfahren umfasst das Bereitstellen des optischen Strahls **54**, Bezugszeichen **90**. Eine bekannte Wellenfrontverzerrung wird anschließend in zumindest eine Wellenlängenkomponente des optischen Strahls **54** eingeführt, um einen verzerrten optischen Strahl zu bilden, Bezugszeichen **92**. Eine Zwischenabbildung des verzerrten optischen Strahls wird danach gebildet, Bezugszeichen **94**. Eine Wellenfrontverzerrungskorrektur wird danach in jede Wellenlänge des optischen Strahls eingeführt, in die die bekannte Wellenfrontverzerrung eingeführt wurde, Bezugszeichen **96**. Die Wellenfrontverzerrungskorrektur ist das Gegenteil der bekannten Wellenfrontverzerrung, die in den optischen Strahl eingeführt wurde. Diese Schritte können bei jeder der Ausführungsformen des optischen Systems **50** ausgeführt werden, die hier diskutiert wurden, oder bei jedem anderen geeigneten optischen System.

[0032] Obgleich eine bestimmte Ausführungsform der Erfindung im Detail zum Zwecke der Erläuterung beschrieben wurde, können verschiedene Modifikationen und Verbesserungen ausgeführt werden, ohne den Umfang der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Optisches System (**20**) mit:
einer Lichtquelle (**52**) für jede Wellenlängenkompo-

nente eines optischen Strahls (54);
 einem Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56), der eine bekannte Wellenfront-Verzerrung in zumindest eine Wellenlängenkomponente des optischen Strahls (54) vor der Bildung einer Zwischenabbildung einführt;
 einer Fokussierungsvorrichtung (58), die den optischen Strahl (54) empfängt, die Zwischenabbildung des optischen Strahls (54) erzeugt und den optischen Strahl (54) ausgibt; und
 einem Wellenfront-Verzerrungskorrektor (60), der nach der Bildung der Zwischenabbildung eine Wellenfront-Verzerrungskorrektur in jede Komponente des optischen Strahls (54), in den die bekannte Wellenfront-Verzerrung durch den Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) eingebracht wird, einführt, wobei die Wellenfront-Verzerrungskorrektur das Umgekehrte der bekannten Wellenfront-Verzerrung ist, die in den optischen Strahl (54) durch den Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) eingeführt wurde, und **dadurch gekennzeichnet**, dass:
 die Lichtquelle eine hohe Leistung hat, die eine Ionisation in einem Gas verursacht, das am Ort der Zwischenabbildung vorhanden ist, falls die Wellenfront nicht verzerrt ist, und
 die bekannte Wellenfront-Verzerrung eine Strahlleistungsdichte an einem Ort der Zwischenabbildung erzeugt, die geringer ist als jene, die das Gas ionisieren wird, das am Ort der Zwischenabbildung vorhanden ist.

2. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der optische Strahl (54) exakt eine Wellenlängenkomponente hat, der Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) die bekannte Wellenfront-Verzerrung in die exakt eine Wellenlängenkomponente einführt und der Wellenfront-Verzerrungskorrektor (60) die Wellenfront-Verzerrungskorrektur in die exakt eine Wellenlängenkomponente einführt.

3. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der optische Strahl (54) eine erste Wellenlängenkomponente und eine zweite Wellenlängenkomponente besitzt, der Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) die bekannte Wellenfront-Verzerrung in die erste Wellenlängenkomponente, aber nicht in die zweite Wellenlängenkomponente einbringt, und der Wellenfront-Verzerrungskorrektor (60) die Wellenfront-Verzerrungskorrektur in die erste Wellenlängenkomponente, aber nicht in die zweite Wellenlängenkomponente einführt.

4. Optisches System (20) nach Anspruch 3, wobei die erste Wellenlängenkomponente und die zweite Wellenlängenkomponente sich in die gleiche Richtung ausbreiten.

5. Optisches System (20) nach Anspruch 3, wobei die erste Wellenlängenkomponente und die zweite Wellenlängenkomponente sich in entgegengesetz-

te Richtungen ausbreiten.

6. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei die Fokussierungsvorrichtung (58) eine Drei-Spiegel-Anastigmatik-Vorrichtung (22) ist.

7. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) ein reflektierendes optisches Element ist.

8. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der Wellenfront-Verzerrungskorrektor (60) ein reflektierendes optisches Element ist.

9. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) ein refraktives optisches Element ist.

10. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) ein diffraktives optisches Element ist.

11. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der Wellenfront-Verzerrungskorrektor (60) ein refraktives optisches Element ist.

12. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der Wellenfront-Verzerrungskorrektor (60) ein diffraktives optisches Element ist.

13. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei der Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) und der Wellenfront-Verzerrungskorrektor (60) getrennt von der Fokussierungsvorrichtung (58) sind.

14. Optisches System (20) nach Anspruch 1, wobei zumindest einer von Wellenfront-Verzerrungsgenerator (56) und Wellenfront-Verzerrungskorrektor (60) einstückig mit der Fokussierungsvorrichtung (58) ausgebildet ist.

15. Verfahren zum Verarbeiten eines optischen Strahls (54) mit den Schritten:

Liefere des optischen Strahls (54); danach
 Einführen einer bekannten Wellenfront-Verzerrung in zumindest eine Wellenlängenkomponente des optischen Strahls (54), um einen verzerrten optischen Strahl (54) zu bilden; danach
 Bilden einer Zwischenabbildung des verzerrten optischen Strahls (54); und danach
 Einführen einer Wellenfront-Verzerrungskorrektur in jede Wellenlängenkomponente des optischen Strahls (54), in die die bekannte Wellenfront-Verzerrung eingeführt wurde, wobei die Wellenfront-Verzerrungskorrektur das Umgekehrte der bekannten Wellenfront-Verzerrung ist, die in den optischen Strahl (54) eingeführt wurde, und dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt des Einführens einer bekannten Wellenfront-Verzerrung den Schritt aufweist:
 Auswählen der bekannten Wellenfront-Verzerrung,

um eine Strahlleistungsdichte an einem Ort der Zwischenabbildung zu erzeugen, die kleiner ist als jene, die ein Gas ionisieren wird, das am Ort der Zwischenabbildung vorhanden ist, wobei der optische Strahl eine hohe Leistung hat, die das Gas am Ort der Zwischenabbildung ionisieren würde, falls die Wellenfront nicht verzerrt wäre.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

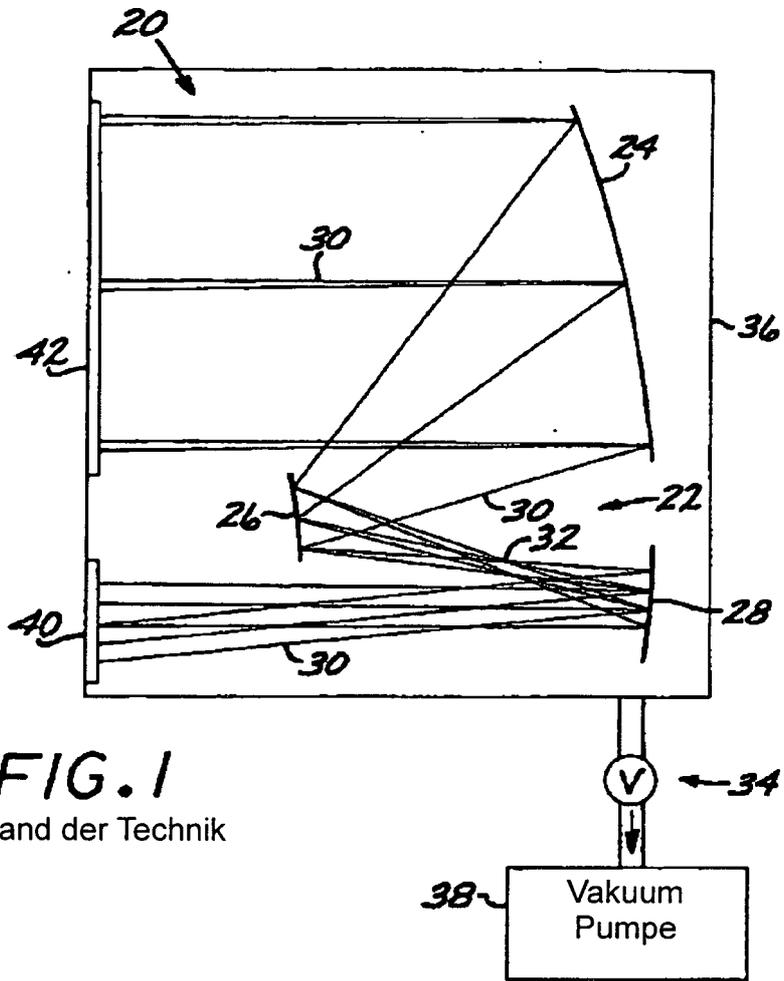


FIG. 1
Stand der Technik

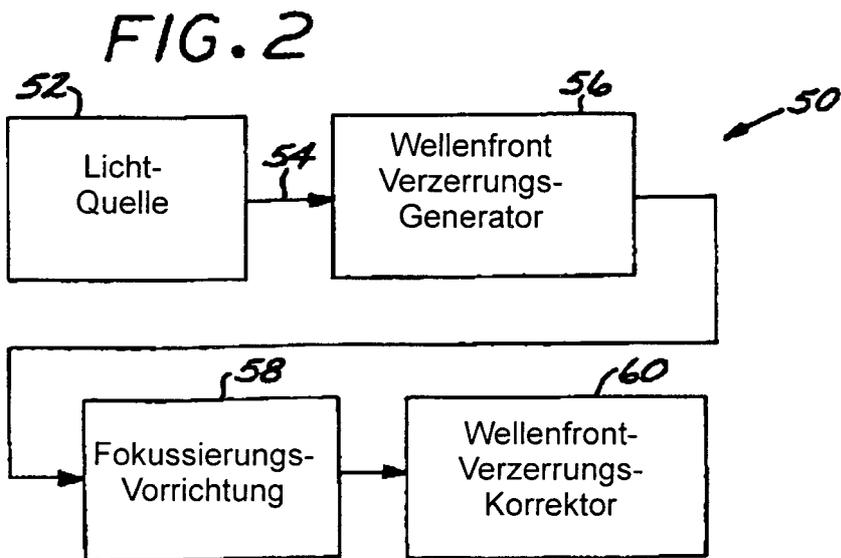


FIG. 2

FIG. 3

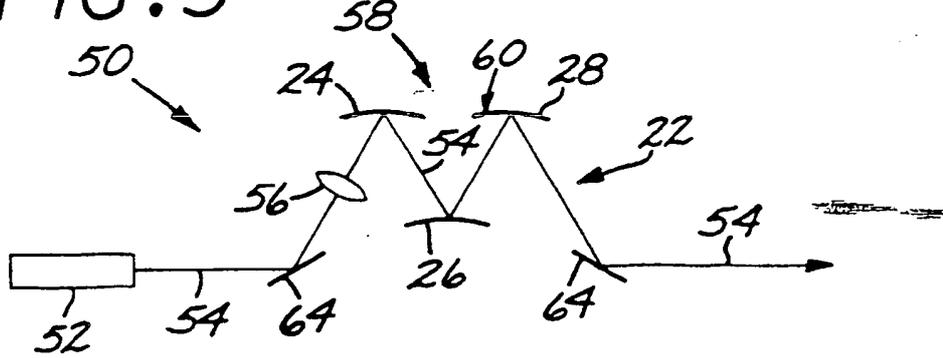


FIG. 4

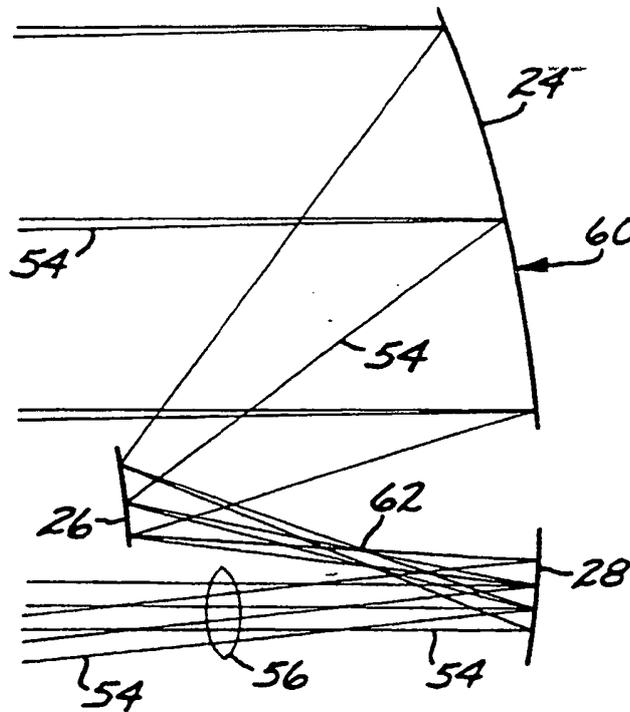


FIG. 5

